

Theoretical Analysis of the Lock-on Range of a Man-portable Air Defense System Under Foggy Conditions with the Radiative-transfer Equation

In Cheol Seok, Chang Min Lee, and Jae W. Hahn[†]

*Nano Photonics Laboratory, School of Mechanical Engineering, Yonsei University,
50, Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul 03722, Korea*

(Received November 12, 2018; Revised December 27, 2018; Accepted January 14, 2019)

MANPADS (man-portable air defense system) is a counterweapon system against enemy aircraft, tracking the MWIR (mid-wavelength of infrared) signature of the plume. Under foggy conditions, however, multiple scattering phenomenon caused by the particles affects the MWIR transmittance, and the MANPADS detection performance. Therefore, in this study we analyzed the lock-on range of MANPADS with varying fog conditions and plume characteristics. To analyze the optical extinction properties and transmittance in fog, Mie scattering theory and analytic solution of the radiative-transfer equation are utilized. In addition, we used flare signature as an alternative MWIR light source. We confirmed that the lock-on range could be noticeably reduced under conditions of mist, and proportional to the flare temperature.

Keywords: MANPADS, Lock-on range, Fog, Radiative transfer equation, Analytic solution

OCIS codes: (010.1310) Atmospheric scattering; (010.5620) Radiative transfer; (040.3060) Infrared

복사전달방정식을 활용한 안개 조건에서의 휴대용 대공 유도미사일 Lock-on range에 대한 이론적 분석

석인철 · 이창민 · 한재원[†]

연세대학교 기계공학과, 나노광자공학 연구실
☎ 03722 서울특별시 서대문구 연세로 50

(2018년 11월 12일 받음, 2018년 12월 27일 수정본 받음, 2019년 1월 14일 게재 확정)

휴대용 대공유도 미사일(Man-Portable Air Defense System)은 플룸의 중적외선 신호를 추적하는 적 항공기의 대응무기체계이다. 안개 조건에서 입자들에 의한 다중 산란현상은 중적외선 파장에서의 투과율과 휴대용 대공유도 미사일 탐지성능에 영향을 준다. 그러므로 본 연구에서 다양한 안개조건과 플룸의 특성에 따른 휴대용 대공유도 미사일의 lock-on range를 분석한다. 안개 조건에서의 광학적 소멸특성과 투과율을 분석하기 위해 미산란(Mie scattering) 이론과 복사전달방정식의 분석적 해를 활용하였다. 뿐만 아니라 중적외선 대체광원으로서 섬광탄 화염 신호를 운용했다. 다양한 시정 및 화염 온도조건에서 분석된 lock-on range는 mist 조건에서 크게 감소하며, 화염 온도가 높아질수록 증가하는 것으로 확인하였다.

Keywords: 휴대용 대공유도 미사일, 추적 사거리, 안개, 복사전달방정식, 분석적 해

OCIS codes: (010.1310) Atmospheric scattering; (010.5620) Radiative transfer; (040.3060) Infrared

I. 서 론

전장에서 공격 및 수송 등의 목적을 위해 침투 비행하는 적 항공기는 아군에 위협요소로 작용한다. 적 항공기 방어에 운용되는 아군의 대응무기체계는 적외선 유도미사일이 있다. 실제로 소비에트-아프간 내전 당시 80% 가량의 적 항공기가

적외선 유도미사일에 의해 격추된 사실을 확인할 수 있다^[1]. 적외선 유도미사일중 지상플랫폼 기반의 무기체계로는 휴대용 대공유도 미사일(Man Portable Air Defense System)이 있다. 이는 침투 비행하는 적기 타격에 효과적이며, 일반적으로 5 km 전후의 유효사거리를 갖는다. 또한 휴대용 대공유도 미사일은 기동장치에 기반을 둔 타 대공무기에 비해 휴대

[†]E-mail: jaewhahn@yonsei.ac.kr, ORCID: 0000-0003-2745-9973

Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

가 용이하므로 지형구분 없이 사용이 가능하고 ‘발사 후 망각 (fire and forget)’ 방식의 특성으로 사수의 생존성이 보장된다는 장점을 지닌다.

휴대용 대공유도 미사일은 항공기 플룸에서 발생하는 강한 중적외선(3~5 μm) 신호를 추적하는 유도 원리를 가지며, 중적외선 신호 전달간 플룸의 신호세기 변화요소로서 플룸 신호와 대기투과율이 주로 고려된다. 특히 대기투과율은 기상 상태에 따라 달라지기 때문에, 휴대용 대공유도 미사일의 추적 성능은 기상상태와 높은 상관관계를 가진다.

대기상태는 시정(visibility)에 따라 다양한 안개 조건으로 분류되며, 각 조건별 안개 입자의 양적 특성이 달라진다. 이 결과, 변화되는 광 흡수 및 다중산란 현상은 대기 투과율 변화에 직접적인 영향을 미친다. 따라서 휴대용 대공유도 미사일 추적성능 분석에 앞서 안개조건에서의 투과율 변화에 대한 연구가 수반되어야 한다.

일반적으로 유도무기 추적성능의 직접적인 지표로서 lock-on range가 활용되며, 이를 분석하기 위해 다양한 대기투과율 계산 방법들이 고려되어 왔다^[2,3]. 대기투과율 계산을 위해 널리 사용되는 상용 소프트웨어로서 MODTRAN (MODerate resolution atmospheric TRANsmission)이 있다. MODTRAN은 고도를 고려한 복잡한 대기환경에서 대기투과율을 분석할 수 있다는 장점으로 여러 군사연구에서 활용되었다^[4,5]. 하지만, MODTRAN으로는 다양한 시정조건에서 다중산란 현상을 분석하는데 어려움을 가진다. 따라서 안개조건 lock-on range 분석을 위해서는 시정을 기반으로 안개입자의 다중산란 현상을 해석하고 대기투과율을 계산하는 방법론을 운용하는 것이 적합하다.

하지만 lock-on range 분석 연구에서는 대기의 복잡한 광학적 특성을 단일 입자에 의한 광 흡수와 산란만으로 고려하는 것이 일반적이었다^[3]. 즉 이러한 방식의 lock-on range 연구는 다중산란 현상이 지배적인 매질 조건에서 적용할 수 없는 한계를 가진다. 따라서 lock-on range 분석에 앞서 안개상태의 복잡한 다중산란 현상을 분석할 수 있는 이론이 필요하다.

흡수 및 산란현상이 발생하는 매질의 특성을 분석하고 투과율을 계산하기 위해 활용되는 방법론으로는 복사전달방정식(Radiative Transfer Equation, RTE)이 있다^[6]. 복사전달방정식의 해를 계산할 수 있는 대표적인 방법으로는 특정 매질 조건의 지배적인 흡수 현상을 고려하는 Beer-Lambert law (BLL)^[7]와 흡수 및 다중산란 현상을 복합적으로 고려할 수 있는 시뮬레이션 기반의 Monte-Carlo 방법^[8]이 있다. 하지만 상기 방법론의 경우 대기 중 산란 조건을 모사할 수 없으며, 결과의 신뢰도 향상을 위해 많은 양의 데이터와 연산 시간을 필요로 하는 단점을 지니고 있다.

이러한 한계를 극복할 수 있는 방안으로 복잡한 다중산란 및 흡수 현상을 르장드르 다항식으로 해석하는 분석적 해(analytic solution) 기법을 활용한다^[9]. 분석적 해는 매질의 복잡한 다중산란 현상을 단순한 다항식으로 해석하기 때문에 계산에 소요되는 시간이 적다. 따라서 계속적으로 변화하는 대기상태를 적시에 대응 분석할 수 있기 때문에 이 기법

은 실시간 작전통제가 요구되는 군에서 적합한 효용성을 가질 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 복사전달방정식의 분석적 해를 기반으로 다양한 안개 조건에서 휴대용 대공유도 미사일의 lock-on range를 분석하였다. lock-on range 분석을 위해서는 투과율 외에 광원 및 배경신호의 세기가 요구된다. 광원은 군사목적상 획득이 제한되는 플룸 신호 대신 중적외선에서 강한 신호를 발산하는 섬광탄(flare)의 화염 신호로 대체하였다. 화염 신호는 연소생성물의 구성물질 및 온도 특성을 기반으로 하는 계산모델인 화염 스펙트럼 모델(flare spectrum model)^[10]을 활용하였다. 안개 배경신호는 Park의 연구결과에 따라 특정 방사율을 가진 회색체(grey body)로 고려하여 획득하였다^[11]. 본 연구 결과를 바탕으로 작전현장에서 인식한 시정에 따라 휴대용 대공유도 미사일의 lock-on range 변화가 예측된다면, 향후 우리 군은 비가시 환경에서 효과적인 적 항공기 대응이 가능할 것으로 기대된다.

II. 연구 방법론

2.1. 광원신호 계산 모델

휴대용 대공유도 미사일은 항공기 플룸에서 발생하는 중적외선(3~5 μm) 신호를 탐지한다. 플룸은 항공기 연료의 연소 과정에서 생성되는 물질의 특성과 온도에 따른 신호를 발산하며, 온도분포는 약 500~600 K^[12]의 범위를 가진다. 하지만 항공기 플룸의 중적외선 신호데이터는 군사연구 목적상의 획득 제한 때문에 본 연구에서는 섬광탄 화염의 중적외선 신호로 광원을 대체하였다.

화염 신호는 연소생성물의 지배적인 흡수현상을 고려한 복사전달방정식을 바탕으로 계산되었다. 이를 위해 열 평형 조건에서 화염의 방사신호와 흡수신호가 동일하다는 키르히호프 법칙을 전제로 하는 화염 스펙트럼 모델^[10]을 활용하였으며, 지배적인 광 흡수 특성과 파장에 따른 다양한 방사율 분포를 가진 기체 상태의 H₂O, CO₂, CO를 연소생성물로 고려하였다. 파수(ν)와 온도(T)에 따라 방사되는 화염 복사세기(I_r)는 식 (1)과 같이 방사율(ϵ , emissivity)과 흑체복사(I_b , black body radiation)의 곱으로써 계산하였다.

$$I_r(\nu, T) = I_b(\nu, T) \times \epsilon(\nu) \quad (1)$$

화염의 열 방사율은 열 흡수율과 동일하기 때문에 BLL 기반의 식 (2)와 같이 계산하였으며, 이때 단위부피당 생성물의 입자 개수는 이상기체 법칙에 따라 P/kT 의 관계로 계산하였다. P 는 압력, k 는 볼츠만 상수, T 는 온도(K)이다.

$$\epsilon(\nu) = 1 - \exp\left(-\frac{qP}{\kappa T} \sigma_{ab} \rho\right) \quad (2)$$

q 는 생성물의 비율, σ_{ab} 는 흡수 단면적, ρ 은 화염의 반경이다. q 를 계산하기 위해서는 화염의 주요 구성물질과 구성

비율을 확인하기 위한 화학적 모델이 필요하다. 운용한 모델은 NASA (National Aeronautics and Space Administration)에서 개발한 도구로서, 특정 온도조건에서 화학시스템의 열역학 특성을 확인할 수 있는 ICT Thermodynamic Code^[13]이며 계산된 연소 생성물과 물 비율은 H₂O (20.312 mole%), CO₂ (8.761 mole%), CO (39.118 mole%)과 같다. 또한, 연소 생성물의 흡수 단면적(σ_{ab} , absorption cross-section)을 계산하기 위해서는 분광학적 모델이 활용된다. 파수(ν , wave number)와 온도(T)에 따른 연소 생성물의 선 세기(S , line intensity)와 분광선 형태(f_ν , line shape)를 바탕으로 식 (3)과 같이 계산할 수 있다.

$$\sigma_{ab}(\nu, T) = S(\nu, T) \times f_\nu(\nu) \quad (3)$$

선 세기(S)는 특정 파수에서 물질이 방출하는 선 신호이다. 한편, 화염의 기압조건(0.1기압 이상)에서 발생하는 입자 충돌 현상은 선 세기의 폭을 증가시킨다. 이 현상을 식 (4)와 같이 로렌츠 선형(Lorentz line shape)의 분광선 형태(f_ν)로 해석할 수 있다.

$$f_\nu(\nu) = \frac{1}{\pi} \frac{a_L}{(\nu - \nu_C)^2 + (a_L)^2} \quad (4)$$

ν_C 는 중심선 파수(line-center wave number), a_L 은 선 폭으로서 압력에 의해 결정되는 함수이다. 선 세기와 선 폭은 기체 상에서 빛의 투과 및 방출 신호를 예측할 수 있는 HITRAN (High-resolution Transmission Molecular Absorption Database) 시뮬레이션을 통해 획득할 수 있다^[14].

2.2. 안개 입자특성 분석

안개는 물 입자의 지배적 특성에 따라 형성되는 대기현상이며, 표 1과 같이 시정(V , visibility)에 따라 구분된다^[15]. 구분된 안개 조건별 빛의 신호감쇄에 영향을 주는 지표로서 소멸계수(k , extinction coefficient)가 활용되며 입자의 개수농도(N , number density)와 소멸단면적(σ_{ex} , extinction cross-section)의 곱으로써 식 (5)와 같이 표현된다.

$$k = N \times \sigma_{ex} \quad (5)$$

Table 1. Classification of fog^[15]

Visibility (V)	Classification
Less than 40 m	Dense fog
40~200 m	Thick fog
200~1000 m	Fog
1~2 km	Mist
2~4 km	Haze
4~10 km	Poor visibility
Greater than 10 km	Good visibility

입자의 개수농도(N)는 시정과 상관관계에 있다. 시정이란 세계 기상기구의 정량적 기준에 따라 550 nm 파장에서 빛의 세기가 5% 이하로 감소하는 지점까지의 거리로서 식 (6a)와 같이 정의된다^[16].

$$V_{\lambda=550\text{ nm}} = \frac{1}{k_{\lambda=550\text{ nm}}} \ln(-0.05) \quad (6a)$$

$$N = \frac{k_{\lambda=550\text{ nm}}}{Q_{\lambda=550\text{ nm}} \pi r^2} \quad (6b)$$

λ 는 파장, Q 는 소멸 효율(extinction efficiency)을 의미하며, 550 nm의 파장에서 소멸 효율은 2에 근사한다^[17]. r 은 입자 반경이며 안개 조건에 따라 다양한 분포를 가진다. 따라서 시정과 입자 반경간의 관계 연구가 선행되었다.

S. G. Narasimhan는 fog, haze, 그리고 일반 대기의 입자를 각각 액적(droplet), 에어로졸(aerosol), 분자(molecule)로 분류하였다^[18]. 액적과 에어로졸의 입자 반경범위는 각각 1~10 μm , 0.01~1 μm 이며 분자상태의 입자 반경은 10⁻⁴ μm 로 설정되었다. T. Elias는 에어로졸과 액적의 중간과정인 수화 에어로졸(hydrated aerosol)을 제시하였다^[19]. 수화 에어로졸이 지배적인 안개 조건에서 측정된 시정은 mist와 유사하였으며 (2~4 km), 입자의 최대 반경은 2.5 μm 로 고려되었다. 따라서 4가지로 설정된 유효 반경(2.5 μm , 1 μm , 0.01 μm , 0.0001 μm) 기준으로 fog, mist, haze, poor visibility, good visibility의 5가지 시정조건을 구분할 수 있다.

한편 Junge의 안개 입경 분포 함수($n(r)$)는 식 (7)과 같이 표현된다^[20]. C 는 농도, γ 는 분포 곡선의 기울기로서 안개 조건에서는 2에 근사한다($\gamma \sim 2$). 또한 반경범위 [r_1 , r_2]에서의 안개 입경 분포를 활용하여 기하학적 부피대비 면적의 비율로서 유효 반경을 식 (8)과 같이 계산할 수 있다^[21].

$$n(r) = \frac{dN}{d \log r} = 0.434 C r^{-(\gamma+1)} \quad (7)$$

$$r_{eff} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r^3 n(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} r^2 n(r) dr} = \frac{r_2 - r_1}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (8)$$

예를 들어, 시정 3 km의 안개에서는 haze (V: 2~4 km)의 입경 분포 [0.01, 1]를 식 (8)에 적용하여 유효 반경을 0.21로 계산할 수 있다. 본 연구에서는 특정 시정에서의 유효 반경을 표 2와 같이 운용하였다.

한편, 중적외선에서의 입자의 소멸단면적은 입자의 크기와 입사하는 광 파장이 유사할 경우 적용 가능한 Mie 산란이론

Table 2. Particle radius with varying visibility^[18-20]

Visibility (km)	Radius (μm)
1	2.5
2	1
3	0.21
4	0.01
10	0.0001

을 사용했다. Mie 산란이론은 적용 파장, 입자의 크기, 그리고 복소 굴절률(complex refractive index)을 고려하여 소멸단면적을 구할 수 있는 방법론이다. 시정 조건별 유효 반경의 크기는 표 2를 활용했으며, Hale and query의 H₂O 복소 굴절률을 활용하였다^[22].

2.3. 대기 투과율 분석

대기는 입자물질 및 고도 등 다양한 변수 요소가 고려되어야 매질이기 때문에 시뮬레이션 또는 계산이론으로 그 특성을 완전하게 구현하기는 어렵다. 특히 고도에 따른 공기밀도 변화는 대기의 주요 특성이며, 매질의 균일성에 영향을 주는 요소이다.

전투 사례에서 침투비행 평균고도는 지면으로부터 약 350 m 이하이며^[23], M. Cavcar의 연구에 따르면 이 고도에서는 공기밀도가 지면의 밀도대비 약 95% 이상으로서^[24], 비교적 일정한 수치를 유지한다. 이에 따라 본 연구에서 적용하는 안개 층은 균일한 매질이라 가정하였다.

흡수 및 산란이 발생하는 균일 매질의 투과율을 계산하기 위해 식 (9)와 같은 복사전달 방정식을 활용한다^[6].

$$\mu \frac{\partial I}{\partial \delta} + \frac{1 - \mu^2}{\delta} \frac{\partial I}{\partial \delta} = -I(\delta, \mu) + \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 P(\cos \alpha) I(\delta, \mu') d\mu' d\phi' \quad (9)$$

$P(\cos \alpha)$ 는 안개 입자 산란의 위상함수(phase function)로서, 산란광의 방향 분포(directional distribution)를 의미한다. α 는 입사광의 굴절각, μ 는 $\cos \theta$, μ' 는 $\cos \theta'$, θ 는 산란광의 고각, θ' 는 입사광의 고각, ϕ 는 산란광의 방위각, ϕ' 는 입사광의 방위각, I 는 빛의 세기, δ 는 광학적 두께를 나타낸다. 광학적 두께는 소멸계수(k)와 이동거리(R)에 영향을 받으며, $\delta = k \times R$ 로 표현된다. 그림 1에서는 복사전달방정식에 요구되는 변수들을 도식하였다.

다중산란에 의한 광 신호를 분석하기 위해 균일한 구형매질과 등방성을 가진 점 광원을 전제로 하여 식 (10)과 같이 위상함수를 르장드르 다항식(L_n)으로 단순 근사화시킨 분석적 해(analytic solution)를 활용하였다^[9].

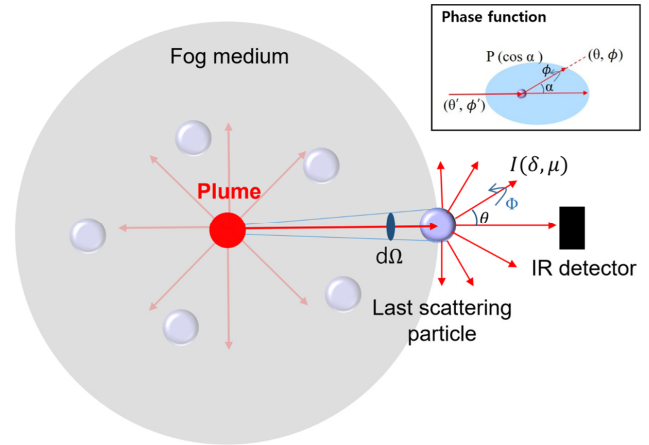


Fig. 1. Schematic of the entire set of geometrical parameters for the calculation of the RTE solution.

$$I(\delta, \alpha) = I_0 \sum_0^{\infty} (g_n(\delta) + g_{n+1}(\delta)) L_n(\alpha) \quad (10)$$

I 는 복사세기, I_0 는 광원의 복사세기이다. $g_0 = 0$, $g_n(T) = \exp(-B_n T - A_n \ln T)$ 로서, 감쇄계수 A_n , B_n 은 $A_n = n + 1$, $B_n = \frac{(2n+1)}{n} (1 - q^{n-1})$ 이다. n 은 감쇄계수와 르장드르 다항식의 차수를 의미하며 광학적 두께에 의해 결정된다^[9]. g 는 산란의 방향성을 의미하는 이방성 계수(anisotropy factor)로서, Mie 산란이론으로 도출할 수 있다.

상기 방정식은 물리적으로 점 광원이 방사하는 모든 방향의 방사속(radiant flux)이 매질을 거쳐 탐지 위치로 도달하는 것을 전제로 한다. 하지만 실제로는 일부 방사속만이 탐지 위치에 도달한다. 이 결과, 그림 1에서의 최종 산란 입자(last scattering particle)가 방사하는 신호량과 입자에 도달한 신호량이 일치하지 않기 때문에 에너지 보존은 성립되지 않는다. 따라서 광원은 특정 미소 입체각($d\Omega$, solid angle)으로 입사된 신호(I_0')로서 정규화(normalization) 되어야 하며, I_0' 는 식 (11)과 같이 표현된다.

$$I_0' = \frac{I_0 \delta^2 d\Omega}{4\pi} = I_0 d\Omega \left[\int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^{\infty} (g_n(\delta) + g_{n+1}(\delta)) L_n(\alpha) d\mu' d\phi' \right]^{-1} \quad (11)$$

미소 입체각은 구심에서 최종 산란 입자간의 입체각으로 설정한다. 따라서 안개 조건에서 대기투과율은 식 (12)와 같이 유도된다.

$$\tau = \frac{I(\delta, \alpha)}{I_0'} \quad (12)$$

2.4. Lock-on Range

Lock-on range는 휴대용 대공유도 미사일의 표적 유도를 위한 사거리로서, 목표물과 배경의 대조신호, 목표물의 면적, 대기투과율, seeker 성능을 고려하여 식 (13)과 같이 표현된다³⁾.

$$R_{LO} = \left[(N_t - N_{b,g})\tau_n \times A_t \left(\frac{\pi}{2} D_0 (NA)\tau_0 (D^*) \left(\frac{1}{(\omega\Delta f)^{1/2} SNR} \right) \right) \right]^{1/2} \quad (13)$$

R_{LO} 는 lock-on range, N_t 는 목표물 신호, $N_{b,g}$ 는 배경 신호, τ_n 은 투과율, A_t 는 목표물 면적, D_0 는 광학계 직경, NA 는 개구수, τ_0 는 광학계 투과율, D^* 는 탐지기의 탐지도(detectivity), ω 는 광학계의 시야각도(field of view), Δf 는 주파수 폭, SNR 은 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)를 나타낸다. $N_{b,g}$ 은 방사율 0.98의 회색체(Grey body)로 고려되었다¹¹⁾. 위에서 제시된 $(N_t - N_{b,g})\tau_n$ 은 대기를 투과한 화염과 대기간의 대조신호량을 의미하며, 식 (14)와 같이 중적외선에서의 적분과정으로 계산된다.

$$(N_t - N_{b,g})\tau_n = \int_{3\mu m}^{5\mu m} (I_F - I_{b,g})\tau d\lambda \quad (14)$$

한편 lock-on range 계산에 활용할 변수로서 휴대용 대공유도 미사일의 seeker 성능 정보데이터는 군사 보안상 접근제한을 가진다, 따라서 본 연구에서는 맑은 대기상태에서 5 km 이외의 lock-on range를 가지는 휴대용 대공유도 미사일의 특성을 활용하여, seeker의 성능과 화염의 면적을 식 (15a)와 같이 특정 상수로 설정하였다. 이 과정에서 시정조건 10 km에서 5 km의 lock-on range 결과산출을 위한 C 값은 $0.681 \text{ km}^4/W$ 로 계산되었다.

$$R_{LO} = \left[\int_{3\mu m}^{5\mu m} (I_F - I_{b,g})\tau d\lambda \times C \right]^{1/2} \quad (15a)$$

$$C = \left[A_t \left(\frac{\pi}{2} D_0 (NA)\tau_0 (D^*) \left(\frac{1}{(\omega\Delta f)^{1/2} SNR} \right) \right) \right]^{1/2} \quad (15b)$$

III. Lock-on Range 분석결과

3.1. 투과 신호 분석

투과 신호 분석을 위해 설정한 광원은 화염으로서, 중적외선 파장범위인 3~5 μm 에서 계산된 신호는 그림 2와 같다.

화염 신호에 영향을 주는 연소생성물은 CO, CO₂, H₂O이다. 4~5 μm 파장에서 발생하는 신호에 지배적인 영향을 미치는 요소는 CO, CO₂이며, 4.3 μm 의 파장에서는 CO₂에 의한 최대 신호가 발생한다.

대조신호는 화염 신호와 안개 배경신호의 차이로 계산된다. 계산에서 적용한 배경신호의 방사율은 0.98로서 1에 근접하지만, 대조신호 계산시 그 영향은 미비한 것으로 확인되

었다. 흑체 복사신호를 고려하는 방사신호 특성상, 온도가 지배적인 영향을 미치기 때문에, 본 연구에서는 대조신호 분석시 온도 분포를 가지는 화염 신호를 중요한 요소로서 해석하였다.

다음으로 화염의 안개 투과 신호 분석을 위해 상기 과정에서 계산한 대조신호에 투과율을 곱하여 파장에 따른 투과 신호를 획득하였다. 투과율 계산은 안개의 물 입자와, 중적외선에서 강한 흡수성향을 가진 대기의 CO₂기체를 고려하여 분석적 해 기반으로 계산하였다. 이 과정에서 안개의 다중산란 효과를 분석하기 위해 화염 온도 600 K, 시정 1 km, 이동거리 1 km 조건에서 BLL 기반의 투과 신호와 비교 분석한 결과는 그림 3과 같다. 4.2~4.5 μm 는 CO₂의 강한 흡수 파장대역으로서 투과 신호가 발생하지 않기 때문에 주로 4.5~5 μm 파장에서 지배적인 투과 신호가 발생한다.

분석적 해 기반의 투과 신호 분석결과, 그림 1의 화염 신호 대비 중적외선 파장에서의 면적은 87.3% 감소한다. 이것은 안개의 흡수, 다중산란의 광학현상에 의한 신호감소 수치를 의미한다. BLL 기반의 투과 신호는 분석적 해 기반의 투과 신호에 비해 높게 나타난다. 특히, 최대 신호량 비교시 4.63 μm 파장에서 약 2배의 높은 수치를 보인다. 또한 중적외선 파장에서의 면적 계산시, BLL 계산 결과 기준으로 RTE 계산결과는 45.9%의 감소를 보였다. 이 수치는 다수의 안개 입

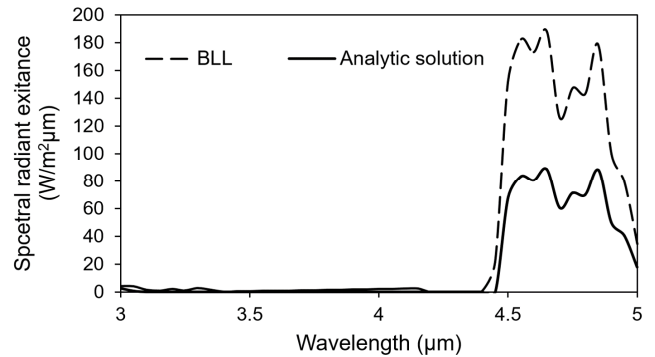


Fig. 2. Calculated spectral radiant exitance of MWIR flare with varying temperature between 500 and 600 K.

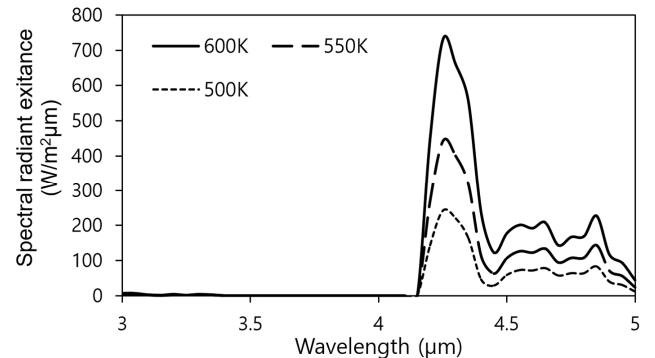


Fig. 3. Comparison of the calculated contrast spectrum obtained from BLL (dash line) and analytic solution (solid line) at 600 K in the fog. Visibility is 1 km and path length is 1 km.

자의 다중산란에 의한 투과 신호 감소 수치를 의미한다. 따라서 다중산란이 고려되지 않는 BLL 방법론을 대기 분석예측 모델로 운용한다면, 실제 탐지신호보다 예측신호가 과다 설정될 우려가 있다. 따라서 lock-on range 계산을 위해 대기 투과율을 계산할 경우 다중산란은 반드시 고려되어야 한다.

3.2. Lock-on Range 분석

휴대용 대공유도 미사일의 lock-on range는 무기체계별로 상이하다. 따라서 본 연구에서는 휴대용 대공유도 미사일을 맑은 대기상태인 10 km의 시정과 600 K의 화염 온도기준으로 lock-on range를 5 km로 설정하였으며, 그림 4와 같이 안개의 시정은 1 km, 2 km, 3 km, 4 km로 구분하고 및 플룸의 온도분포는 500 K, 550 K, 600 K로 고려하여 휴대용 대공유도 미사일의 lock-on range를 분석하였다.

lock-on range는 대조신호와 대기투과율의 영향을 받는다. 대조신호는 화염의 온도가 지배적인 영향을 미치며, 화염의 온도가 증가할수록 lock-on range가 높아지는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 시정 2 km 이내의 안개 조건에서는 감소율이 커지며, 이 현상은 안개의 투과율 변화 개념으로 해석할 수 있다.

mist에서 투과율 변화는 안개의 유효 반경변화와 관련이 있다. 표 2에서 분류했던 시정과 유효 반경관계에서는 2 km의 시정을 전, 후로 안개 입자가 액적과 에어로졸로 구분된다. 따라서 시정이 2 km보다 낮은 mist에서는 액적에 의한 중적외선 다중산란 및 흡수현상으로 투과율이 감소된다고 해석할 수 있다. 반면 시정이 2 km 이상에서는 에어로졸 입자가 액적에 비해 중적외선 다중산란 및 흡수현상이 지배적이지 않기 때문에 lock-on range의 변화율이 작다고 해석할 수 있다.

IV. 결 론

안개의 입자특성 분석과 RTE의 분석적 해를 활용하여 다중산란이 발생하는 안개의 시정조건에서 대기투과율을 구하

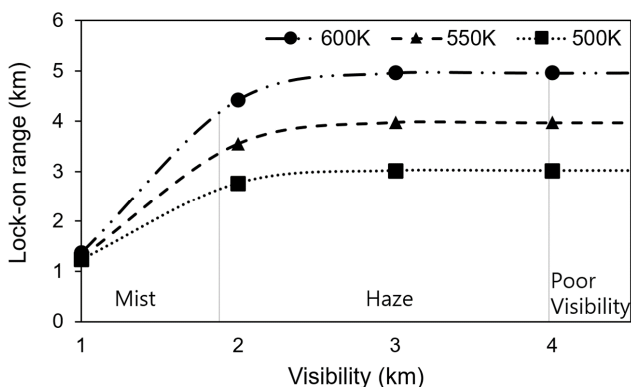


Fig. 4. Comparison of the calculated lock-on range with varying visibility and temperature. Flare temperatures are 500 K, 550 K, and 600 K.

였으며 화염의 연소생성물의 온도와 물질특성을 기반으로 화염 신호를 계산하였다. 이 과정을 바탕으로 계산한 lock-on range는 입자 유효입경의 변화율이 큰 Mist조건에서 감소비율이 크고, 플룸의 온도와 비례관계가 있음을 확인하였다.

실제 전장에서는 적 항공기가 지상목표 공격 목적으로 안개층 내부에서 운항하는 것은 예측 가능한 상황이다. 이러한 안개 조건에서 입자의 다중산란 현상을 적용한 대기투과율을 적용하였기 때문에, 변화하는 전장 기상상황에서도 휴대용 대공유도 미사일을 성공적으로 운용할 수 있다. 즉 본 연구결과는 현장에서 판단한 시정을 바탕으로, 감소된 사거리에 따라 휴대용 대공유도 미사일이 운용되는데 도움이 될 것이다.

뿐만 아니라, 안개의 Visibility 조건과 투과율의 상관관계는 레이저 무기, 반 능동형 유도무기 등과 같은 광 신호기반의 무기체계 성능변화에 영향을 준다. 따라서 본 연구는 향후 다양한 유도무기 성능예측 연구를 위한 기초 자료로도 유용하게 활용될 것이다.

References

1. M. Richardson, "The anatomy of the MANPAD," Proc. SPIE **6738**, 1-11 (2007).
2. S. P. Mahulikar, G. A. Rao, and P. S. Kolhe, "Infrared signatures of low-flying aircraft and their rear fuselage skin's emissivity optimization," J. Aircraft **43**, 226-232 (2006).
3. M. S. Ab-Rahman and M. R. Hassan, "Lock-on range of infrared heat seeker missile," in Proc. International Conference on Electrical Engineering and Informatics (Selangor, Malaysia, Aug. 2009), pp. 472-777.
4. V. Dhar and Z. Khan, "Comparison of modeled atmosphere dependent range performance of long-wave and mid-wave IR imagers," Infrared Phys. Technol. **51**, 520-527 (2008).
5. N. Baranwal and S. P. Mahulikar, "Aircraft engine's infrared lock-on range due to back pressure penalty from choked convergent nozzle," Aerosp. Sci. Technol. **39**, 377-383 (2014).
6. S. Chandrasekhar, Radiative transfer (Dover Publication, New York, USA, 1960).
7. B. Lacaze, "Gaps of free-space optics beams with the Beer-Lambert law," Appl. Opt. **48**, 2702-2706 (2009).
8. P. F. Liaparinos, I. S. Kandarakis, D. A. Cavouras, H. B. Delis, and G. S. Panayiotakis, "Modeling granular phosphor screens by Monte Carlo methods," Med. Phys. **33**, 4503-4514 (2006).
9. S. G. Narasimhan and S. K. Nayar, "Shedding light on the weather," in Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (Monona Terrace Convention Center Madison, USA, Jun. 2003), pp. 665-672.
10. K. Han and J. W. Hahn, "Uncertainty analysis of the flame temperature determination based on atmospheric absorption effect with optical emission spectroscopy," Combust. Sci. Technol. **190**, 2044-2060 (2018).
11. W. Park, J. S. Won and H. S. Jung, "Retrieval of relative surface temperature from single-channel middle-infrared

- (MIR) images,” Korean J. Remote Sens. **29**, 95-104 (2013).
12. Y. Kim, H. J. Kwon, and S. H. Ahn, “Wavelength-band translation method of infrared image using temperature estimation,” J. Korean Inst. Inf. Technol. **11**, 35-43 (2013).
 13. H. Bathelt and F. Volk, “The ICT-thermodynamic code (ICT-code),” in *Proc. 27th International Annual Conference of ICT* (Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie, Germany, Jun. 1996), pp. 92.
 14. L. S. Rothman, C. P. Rinsland, A. Goldman, S. T. Massie, D. P. Edwards, J. M. Flaud, A. Perrin, C. Camy-Peyret, V. Dana, J. Y. Mandin, J. Schroeder, A. Mccann, R. R. Gamache, R. B. Wattson, K. Yoshino, K. V. Chance, K. W. Jucks, L. R. Brown, V. Nemtchinov, and P. Varanasi, “The hitran molecular spectroscopic database and hawks (hitran atmospheric workstation): 1996 edition,” J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf. **60**, 665-710 (1998).
 15. D. S. Deshpande and V. U. Kale, “Analysis of the atmospheric visibility restoration and fog attenuation using gray scale image,” in *Proc. Satellite Conference ICSTSD 2016 International Conference on Science and Technology for Sustainable Development* (Kuala Lumpur, Malaysia, May. 2016), pp. 32-37.
 16. J. W. Cho, Y. S. Choi, and K. M. Jeong, “Visibility of thermal infrared camera under invisibility (dense Aerosol) environments,” J. Inst. Control Robot. Syst. **23**, 515-523 (2017).
 17. H. C. Van de Hulst, *Light scattering by small particle*, (Wiley, New York, USA, 1957).
 18. S. K. Nayar and S. G. Narasimhan, “Vision in bad weather,” in *Proc. IEEE International Conference Computer Vision* (Corfu Holiday Palace, Greece, Sep. 1999), pp. 820-827.
 19. T. Elias, “Enhanced extinction of visible radiation due to hydrated aerosols in mist and fog,” Atmos. Chem. Phys. **15**, 6605-6623 (2015).
 20. C. E. Junge, *Air chemistry and radioactivity* (Academic Press, New York, USA, 1963).
 21. M. Grabner and V. Kvicera, “The wavelength dependent model of extinction in fog and haze for free space optical communication,” Opt. Express **19**, 3379-3386 (2011).
 22. G. M. Hale and M. R. Querry, “Optical constants of water in the 200 nm to 200 μm wavelength region,” Appl. Opt. **12**, 555-563 (1973).
 23. T. Ohlemacher. “Bridging people and protest: social relays of protest groups against low-flying military jets in west germany.” Soc. Probl. **43**, 197-218 (1996).
 24. M. Cavcar, *The International standard atmosphere (ISA)*, (Anadolu University, Eskisehir, Turkey, 2000).